

**Parallelforum 4C**  
**Power-to-X**

## **Aus verfügbaren Kohlenstoffquellen und erneuerbarem Wasserstoff nachhaltig erzeugtes Kerosin** Techno-ökonomische Bewertung

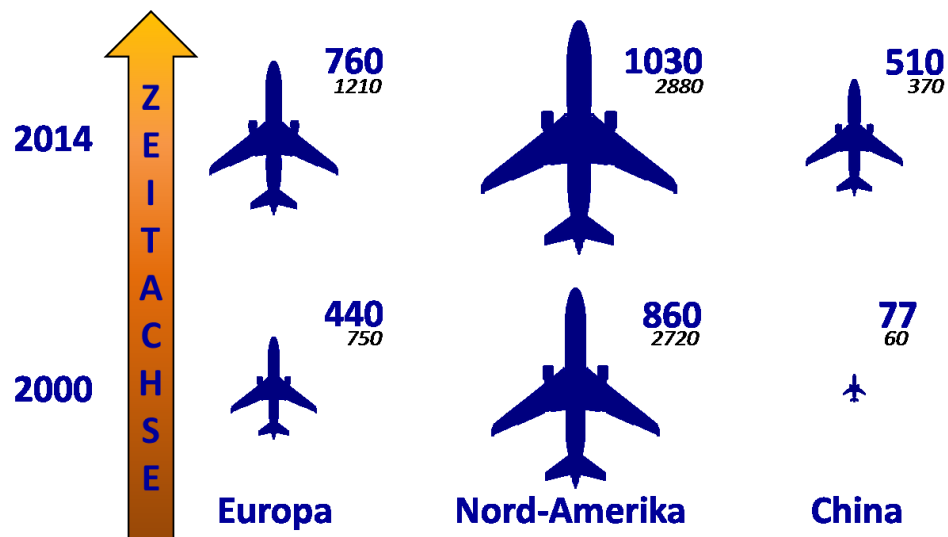
Friedemann G. Albrecht, Ralph-Uwe Dietrich,  
DLR e.V.

Berlin,  
24. Januar 2017

Wissen für Morgen

# Luft- und Raumfahrt 2016

## LUFTFAHRT – Synthetische Treibstoffe



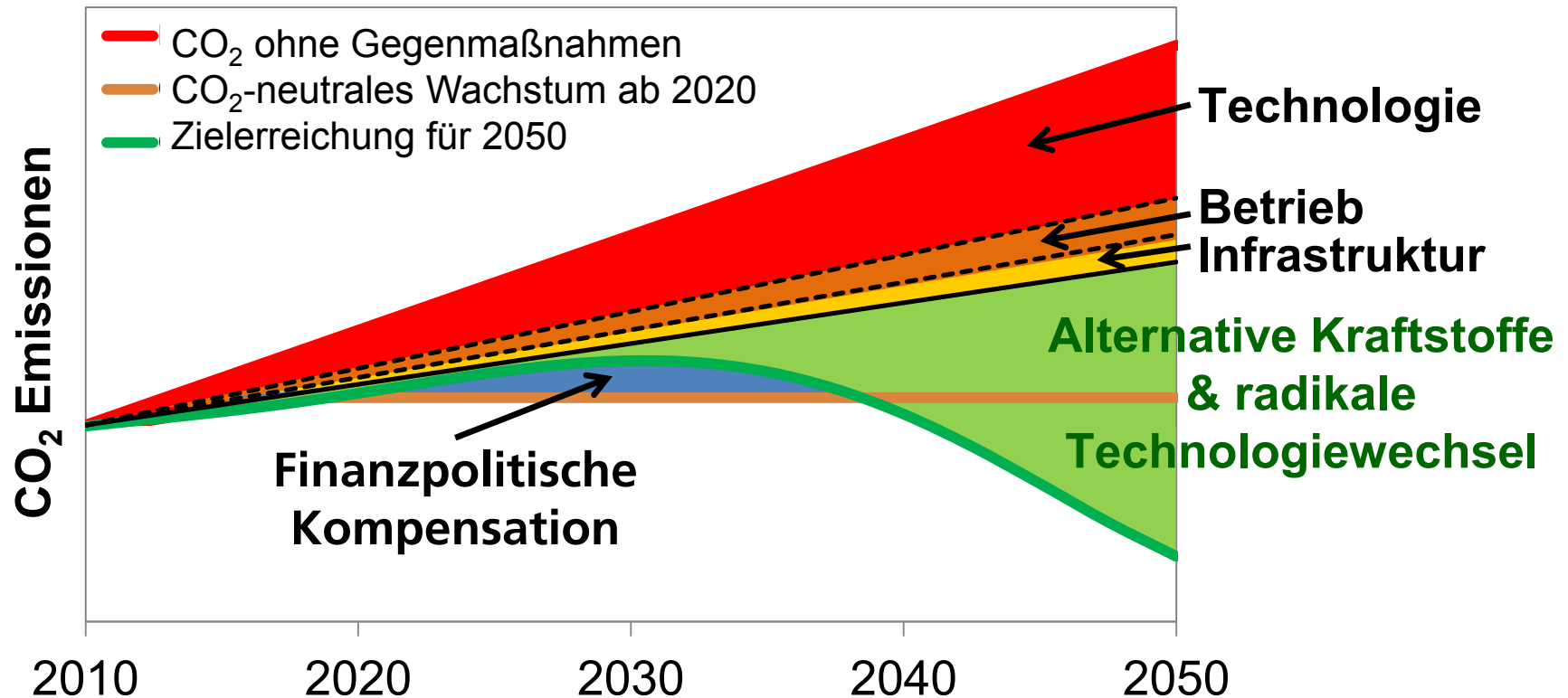
- Vergleich der Flugverkehrsleistungen innerhalb dreier Weltregionen in Mrd. Pkm/a (*kursiv: Pkm/a Kopf*)

Quelle: Thess et al., DGLR-Mitgliedermagazin „Luft- und Raumfahrt“ Ausgabe 2/2016, S.20 ff.,



# IATA Technology Roadmap

4. Edition, Juni 2013



- Ziel 1: Verbesserung der Brennstoffeffizienz um 1,5 % p.a. bis 2020
- Ziel 2: CO<sub>2</sub>-neutrales Wachstum des Luftverkehrs ab 2020
- Ziel 3: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50 % bis 2050 ggü. 2005



# Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)<sup>[1]</sup>

Rohstoffe	Synthesetechnologie	Kraftstoff
Kohle, Erdgas, Biomasse, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub>	Fischer-Tropsch (FT) Synthese	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)	Synthetische Iso-Paraffine / Farnesan
Bioethanol (-propanol, -butanol)	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)	AD-SPK

## - AtJ aus Deutschland?

- Anbaufläche<sub>2016</sub><sup>[2]</sup>: **3,2 Mio.ha** → Ethanolерtrag: **2,2 t/ha**<sup>[3]</sup>

Umwandlung zu Kraftstoff<sup>[4]</sup>: **0,56 t<sub>Kerosin</sub>/t<sub>Ethanol</sub>**

Kerosinertrag auf Basis Weizen: **4 Mio.t/a** (≈ 37 % des Luftfahrtbedarfs)

- Deckung des Kerosinbedarfs: **11 Mio.ha** (≈ 58 % der deutschen Ackerfläche)

[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015

[2] Statista, „Anbaufläche von Getreide in Deutschland“, 2015

[3] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, „Steckbrief Ethanol-Kraftstoff“, 2016

[4] NREL, „Review of Biojet Fuel Conversion Technologies“, Golden, 2016





# Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)<sup>[1]</sup>

Rohstoffe	Synthesetechnologie	Kraftstoff
Kohle, Erdgas, Biomasse, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub>	Fischer-Tropsch (FT) Synthese	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSH)	Synthetische Iso-Paraffine / Farnesan
Bioethanol (-propanol, -butanol)	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)	AD-SPK

## - DSH aus Deutschland? –

- Anbaufläche<sub>2016</sub><sup>[2]</sup>: 0,254 Mio.ha ➔ Zuckerertrag: 11,6 t/ha<sup>[2]</sup>  
Umwandlung zu Kraftstoff<sup>[3]</sup>:  $0,168 \frac{\text{t}_{\text{Kerosin}}}{\text{t}_{\text{Zucker}}}$
- Kerosinertrag auf Basis Zuckerrüben: 0,5 Mio.t/a ( $\approx 4.6 \%$  des Bedarfs)
- Deckung des Kerosinbedarfs: **5,5 Mio.ha** ( $\approx 30 \%$  der deutschen Ackerfläche)

[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015

[2] Statista, „Anbaufläche von Getreide in Deutschland“, 2015.

[3] NREL, „Review of Biojet Fuel Conversion Technologies“, Golden, 2016



# Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)

Rohstoffe	Synthesetechnologie	Kraftstoff
Kohle, Erdgas, Biomasse, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub>	Fischer-Tropsch (FT) Synthese	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)	Synthetische Iso-Paraffine / Farnesan
Bioethanol (-propanol, -butanol)	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)	AD-SPK

## - HEFA aus Deutschland? – Beispiel Rapsöl

- Anbaufläche<sub>2016</sub><sup>[2]</sup>: 1,4 Mio.ha Rapsölertrag: 2,6 Mio.t/a<sup>[2]</sup>
- Umwandlung zu Kraftstoff<sup>[3]</sup>:  $0,49 \text{ t}_{\text{Kerosin}} / \text{t}_{\text{Rapsöl}}$
- Kerosinertrag auf Basis Rapsöl: 1,3 Mio.t/a ( $\approx 12 \%$  des Bedarfs)
- Deckung des Kerosinbedarfs: **12 Mio.ha** ( $\approx 64 \%$  der deutschen Ackerfläche)

[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015

[2] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, „Ernte 2014: Mengen und Preise“, 2014

[3] DBFZ, „Abschlussbericht Projekt BurnFAIR“, 2014



# Kraftstoffoptionen für einen nachhaltigen Flugverkehr

- Zertifiziert für 50 % Beimischung in Flugtreibstoffen (ASTM D756614c)

Rohstoffe	Synthesetechnologie	Kraftstoff
Kohle, Erdgas, Biomasse, CO <sub>2</sub> & H <sub>2</sub>	Fischer-Tropsch (FT) Synthese	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Pflanzliche Öle und Fette (z.B. aus Soja, Raps, Palmöl, ... Algen, Abfallspeiseöle, ...)	Hydrierung+Cracken+Isomerisierung (katalyt.) von Estern und Fettsäuren (HEFA)	Synthetisches paraffinisches Kerosin (SPK)
Zucker oder Stärke aus Biomassepflanzen (Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais)	APR+Hydrierung (katalyt.) / Fermentation: Direct Sugars to Hydrocarbons (DSHC)	Synthetische Iso-Paraffine / Farnesan
Bioethanol (-propanol, -butanol)	Dehydratisierung+Oligomerisierung+Hydrierung (Alcohol-to-Jet, AtJ)	AD-SPK

## - Fischer-Tropsch-Kerosin aus Deutschland?

- Im Industriemaßstab verfügbare kommerzielle Technologie
- Basis: Synthesegas aus Stroh, Restholz, org. Abfälle, Industrieabgasen, ...
- Luftverkehr mit rein synthetischem Kerosin möglich [2]

[1] ASTM International, „ASTM D7566 - 14C: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons“, 2015

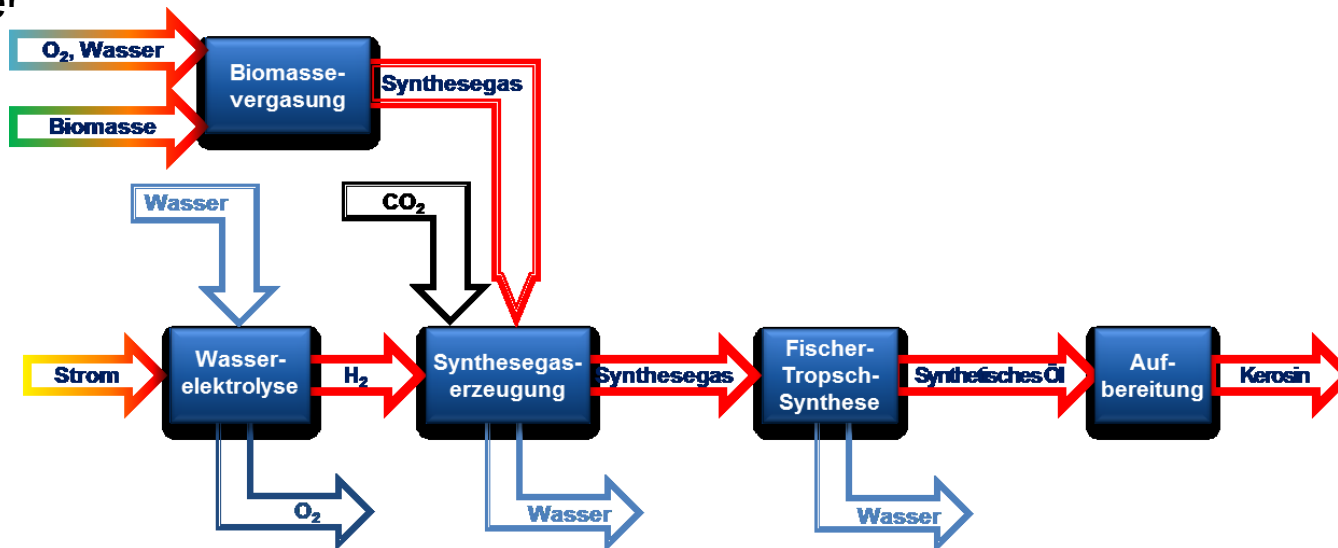
[2] UK Ministry of Defense, „DEF STAN 91-91: Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A-1“, UK Defense Standardization, 2011



# Verfahrensschema für nachhaltiges FT-Kerosin

Rohstoffe:

- CO<sub>2</sub>-neutraler Strom: Wind, PV, Solarkraftwerke, (Nuklear?)
- „grünes“ CO<sub>2</sub>: Abscheidung aus Luft bzw. Biomasse / „graues“ CO<sub>2</sub>: Industrie
- Wasser



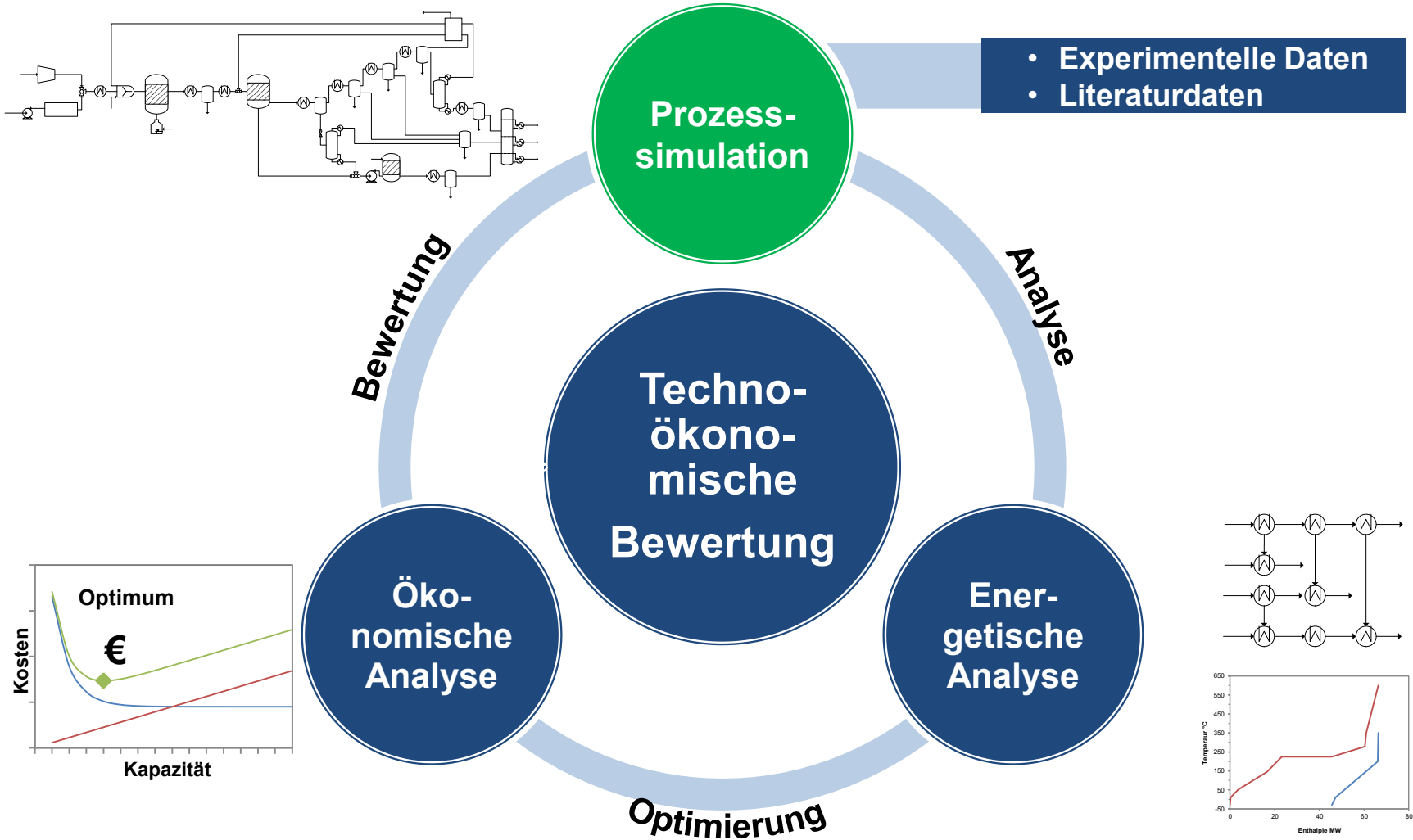
Synthese basierend auf bewährter fossiler Produktionstechnik:

- Secunda CTL (Sasol): 160.000 bpd (ca. 7 Mio.t/a)
- Pearl GTL (Qatar Petroleum + Shell): 140.000 bpd (ca. 6 Mio.t/a) – seit 2011

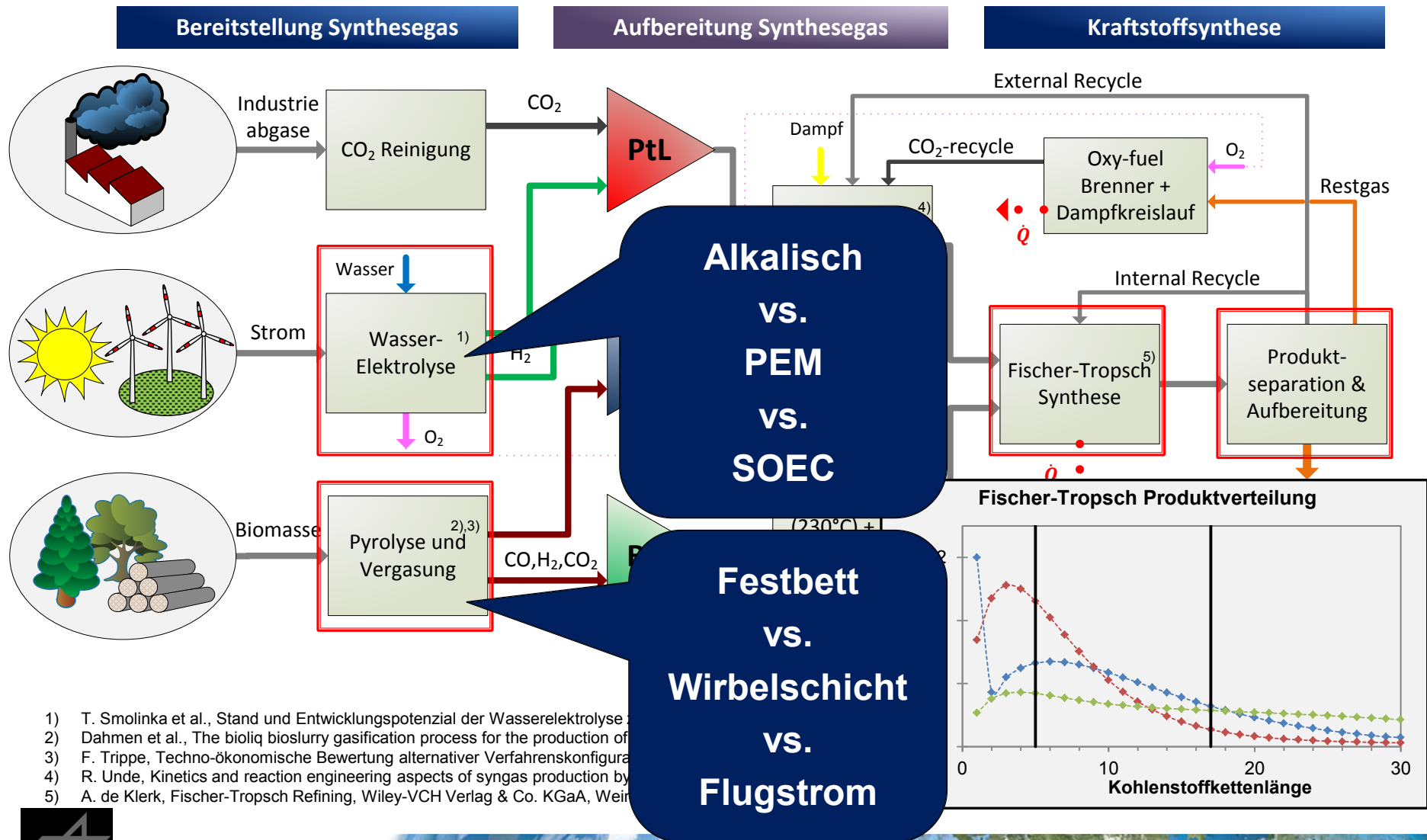




# Techno-ökonomische Prozessbewertung am DLR

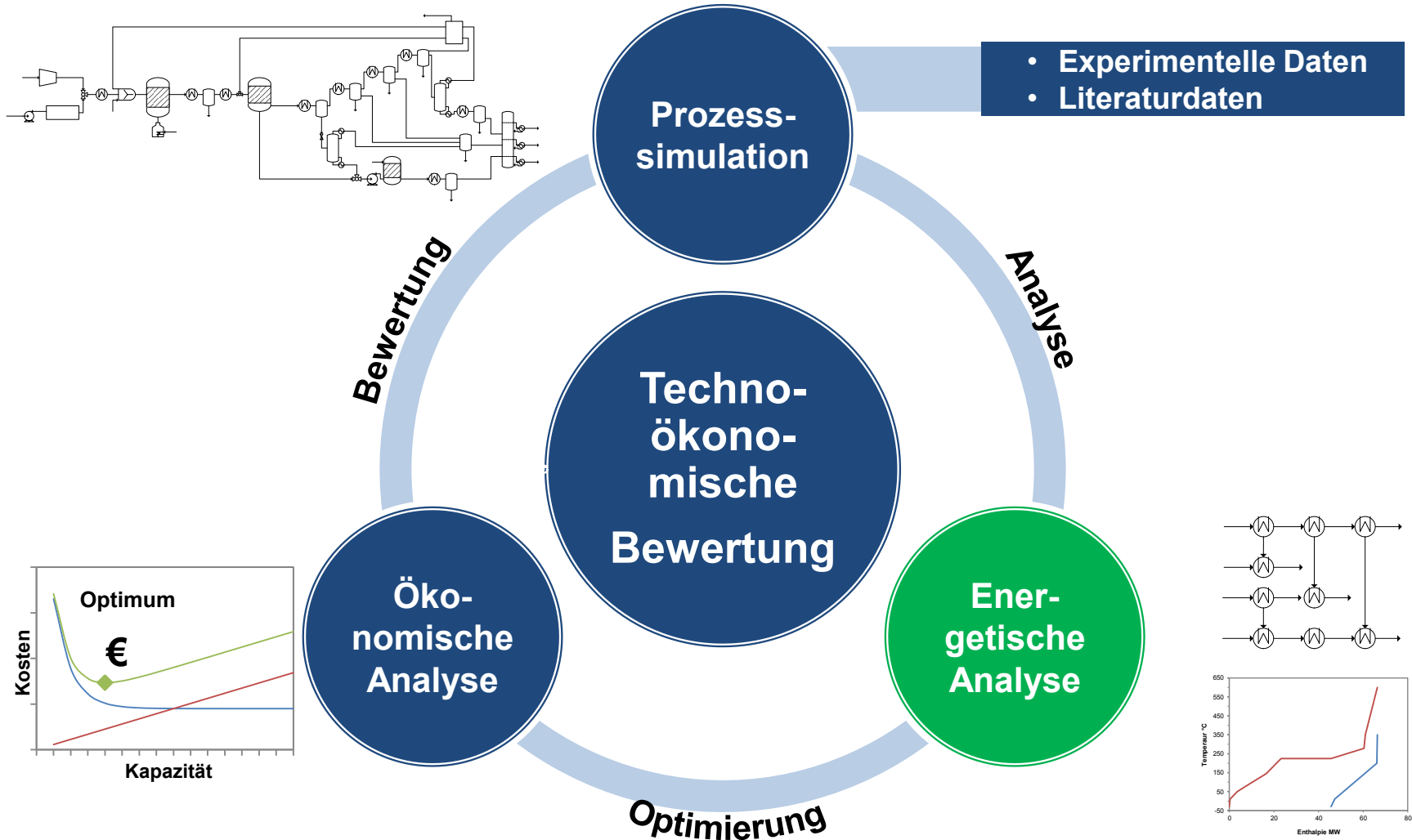


# Prozesssimulation



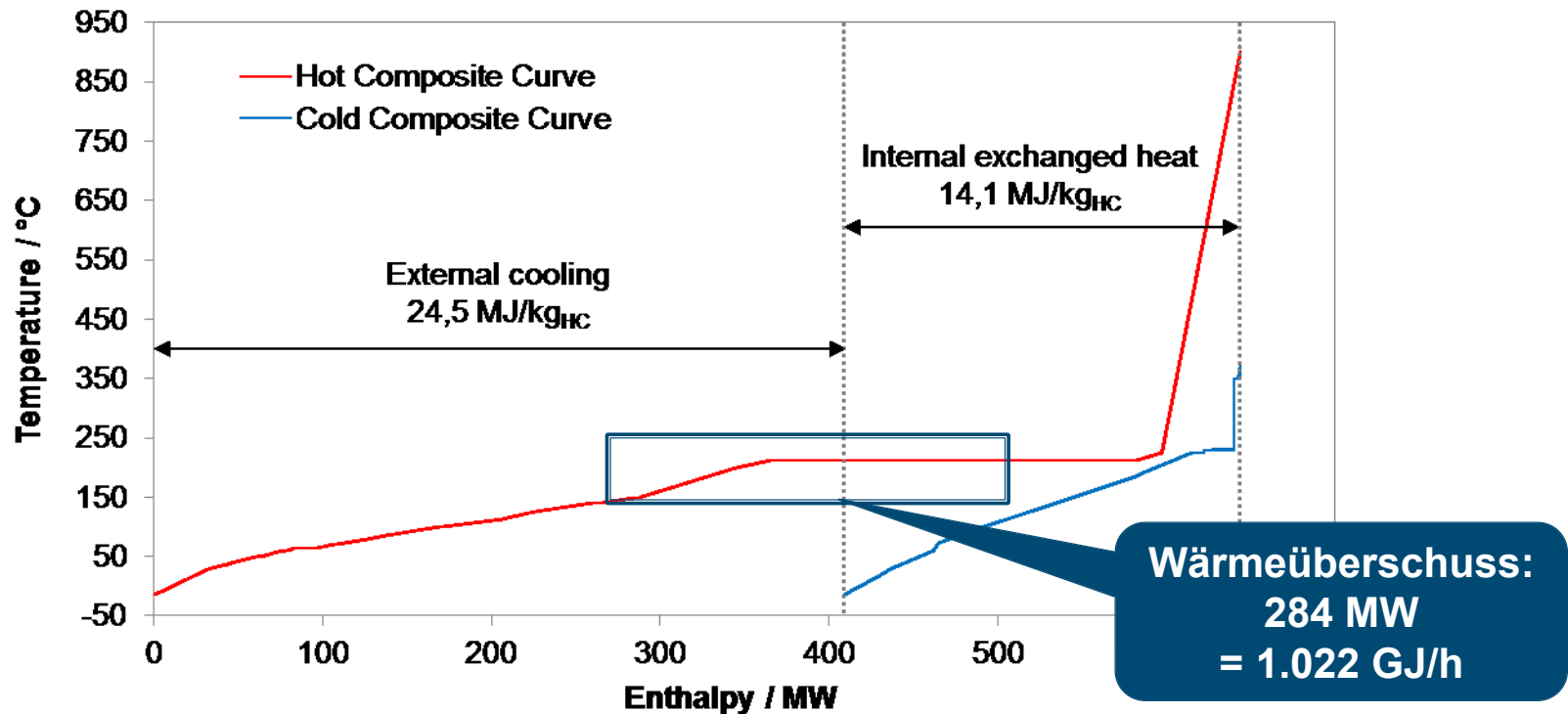
- 1) T. Smolinka et al., Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse
- 2) Dahmen et al., The bioliq bioslurry gasification process for the production of
- 3) F. Trippe, Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigura
- 4) R. Unde, Kinetics and reaction engineering aspects of syngas production by
- 5) A. de Klerk, Fischer-Tropsch Refining, Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Wein

# Techno-ökonomische Prozessbewertung am DLR



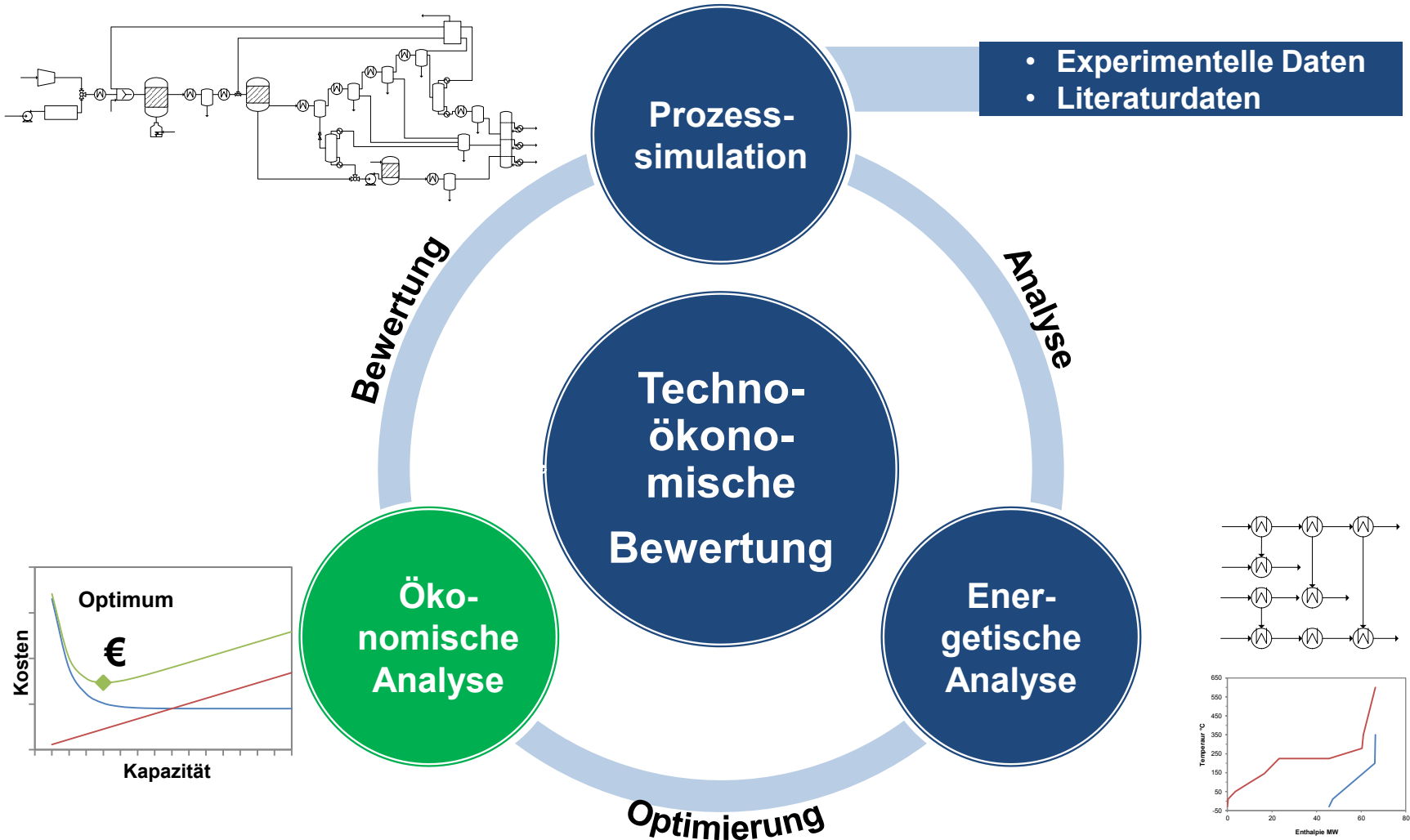
# Energetische Prozessoptimierung

## Pinchanalyse des Fischer-Tropsch-Prozesses (PTL-Basisfall <sup>1,2</sup>)



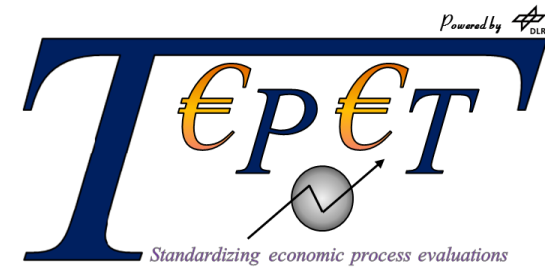
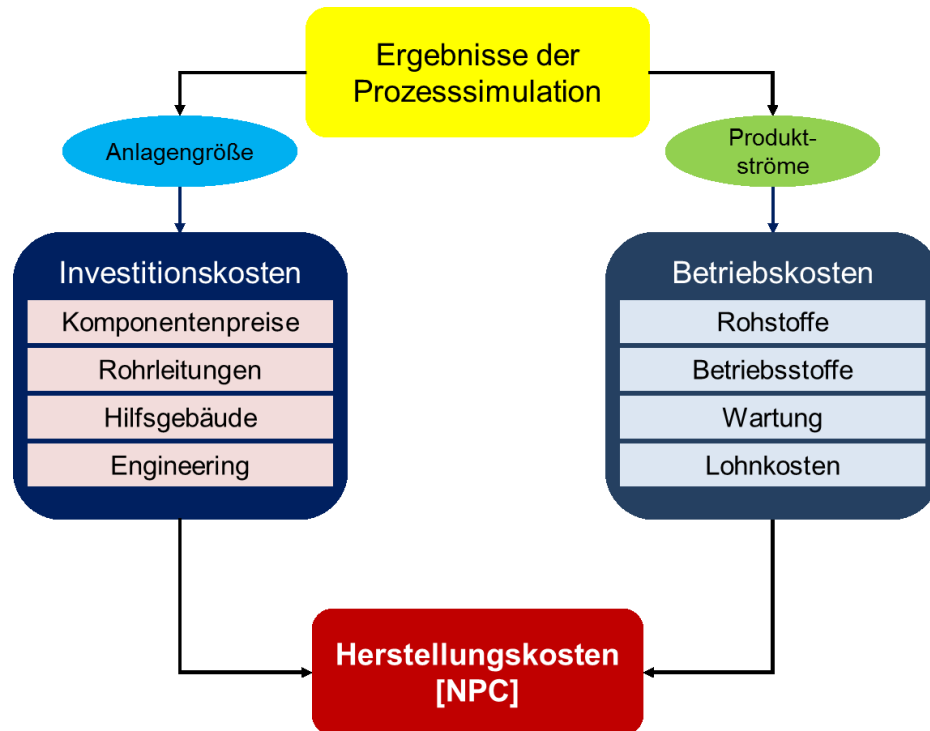
- Abwärme des PTL-Prozesses für CO<sub>2</sub>-Abscheidung nutzbar
- Prozessintegration von CO<sub>2</sub>-Abscheidung und PtL-Prozess

# Techno-ökonomische Prozessbewertung am DLR





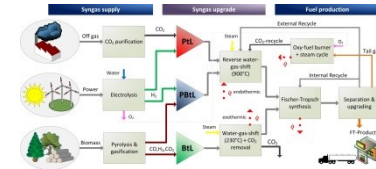
# Grundlagen der techno-ökonomischen Bewertung



- Transparente, jahresspezifische Investitions- und Betriebskosten (2014)
- Jährliche Anpassung mittels Chemical plant cost index (CEPCI)
- AACE Estimate Classification System Class III – IV:  $\pm 30\%$  Genauigkeit



# Annahmen diktieren das Ergebnis



## Anlagengröße:

**107 kt/a**

(1 % des deutschen Kerosinbedarfs)

## Investitionskosten:

*PEM-Elektrolyseur:*

**640 €/kW<sup>[1]</sup>**

(installierte Leistung)

*Flugstromvergaser:*

**103.650 €/(kg<sub>Slurry</sub>/h)<sup>[2]</sup>**

(Scale-factor 0.7)

## Rohstoffpreise:

*Strom:*

**105 €/MWh<sup>[3]</sup>**

(Industrielle Großabnehmer)

*Biomasse (35% Restfeuchte):*

**97.4 €/t<sup>[4]</sup>**

## Allgemeine ökonomische Annahmen:

*Referenzjahr:* 2015

*Anlagenbetrieb:*

30 Jahre

*Betriebsstunden:* 8,260 h/Jahr

*Kapitalzins:*

7 %

[1] G. Saur, Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study, Technical Report NREL, 2008

[2] P. Kerdoncuff, Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation, Dissertation, KIT, Karlsruhe, 2008

[3] Eurostat, Preise Elektrizität für Industrieabnehmer in Deutschland, 2014

[4] C.A.R.M.E.N. – Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel (Energieholz-Index)

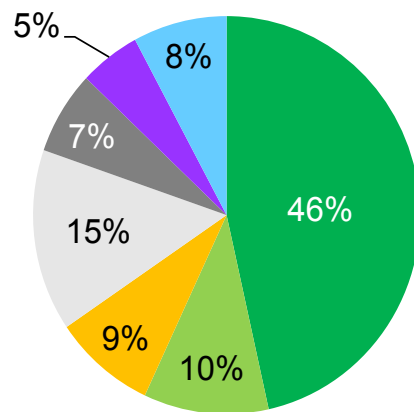


# Techno-ökonomische Bewertung

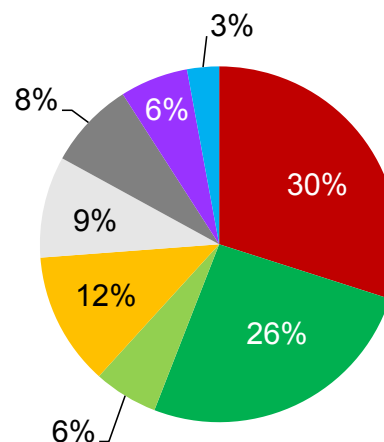
## Kostenschätzung PtL / BtL / PBtL



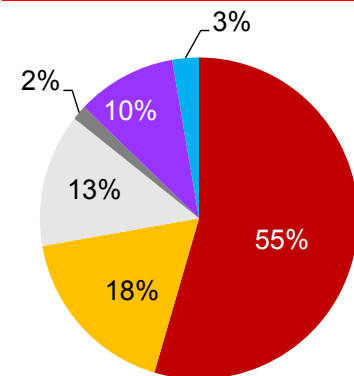
**BTL – TCI = 1,4 Mrd.€**



**PBTL – TCI = 1,0 Mrd.€**



**PTL – TCI = 906 M€**



[1] G. Saur, Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study, Technical Report NREL, 2008 (640 €/kW)  
 [2] P. Kerdoncuff, Modellierung und Bewertung von Prozessketten zur Herstellung von Biokraftstoffen der zweiten Generation, Dissertation, KIT, Karlsruhe, 2008 (103.650 €/kg<sub>Slurry</sub>/h)



# Techno-ökonomische Bewertung

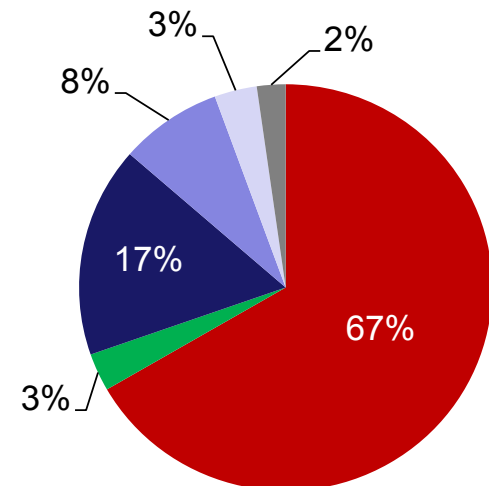
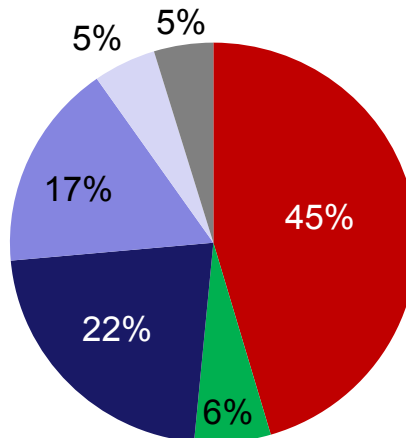
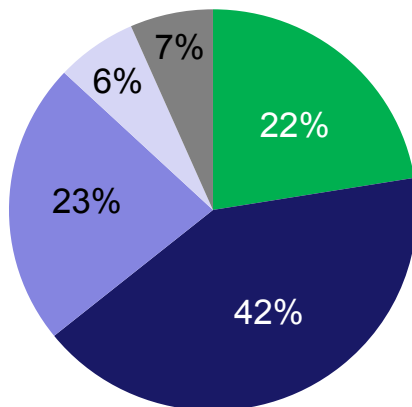
## Kostenschätzung PtL / BtL / PBtL

- Stromkosten <sup>[3]</sup>
- Biomasse-<sup>[4]</sup> & CO<sub>2</sub>-Kosten
- Kapitalkosten
- Betriebs- & Wartungskosten
- Versicherungen & Steuern
- Utilities

**BTL – NPC = 1.91 €/l**

**PBTL – NPC = 2.36 €/l**

**PTL – NPC = 2.87 €/l**



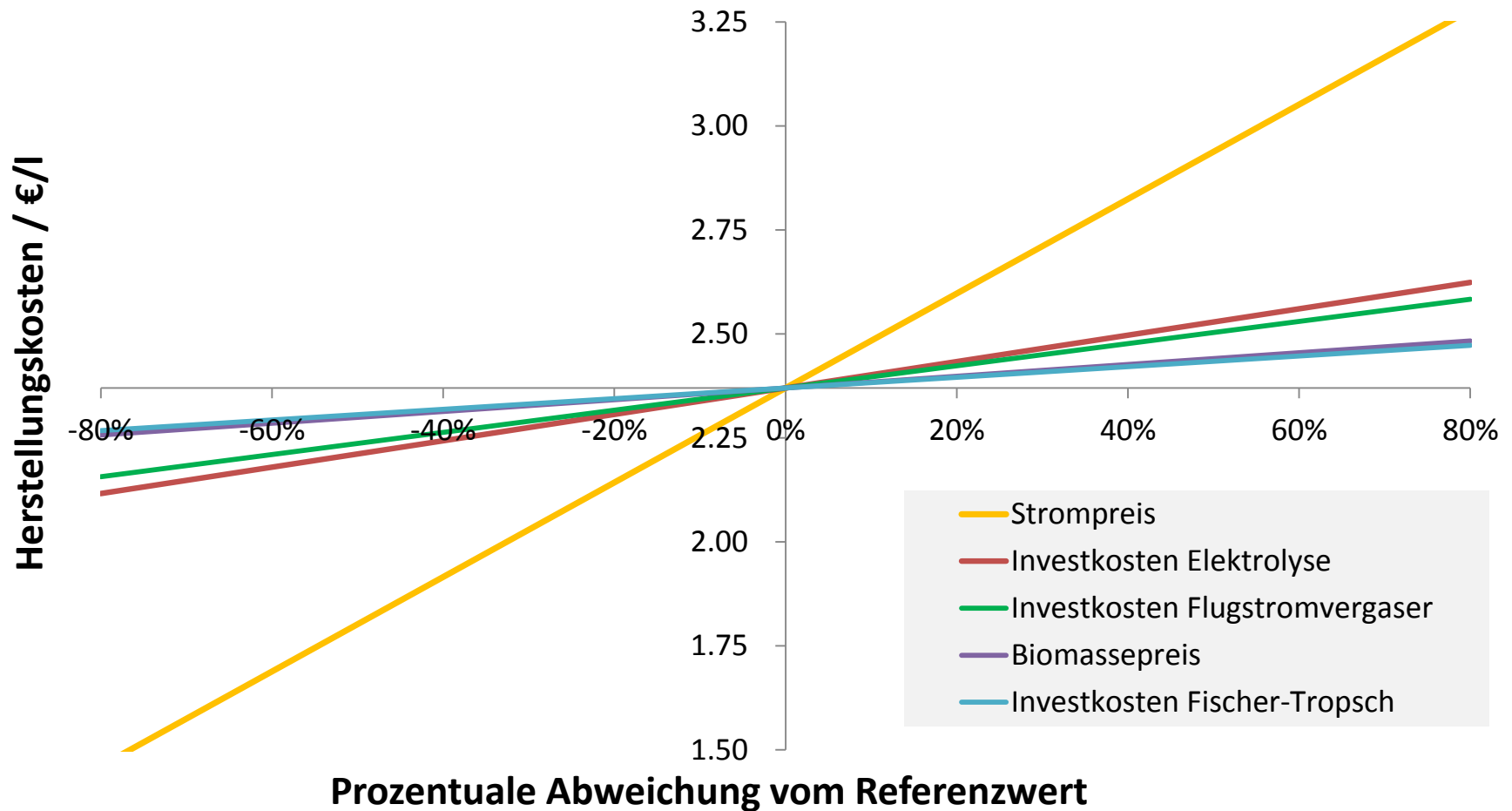
[3] Eurostat, Preise Elektrizität für Industrieabnehmer in Deutschland, 2014 (105 €/MWh)

[4] C.A.R.M.E.N. – Preisentwicklung bei Waldhackschnitzel, Energieholz-Index (97,4 €/t)



# Techno-ökonomische Bewertung

Preisrelevante Faktoren ( **PBTL – NPC = 2.36 €/l** )





# Rohstoffbedarf für nachhaltiges FT-Kerosin



+

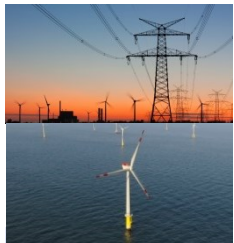


- 33 Mt/a CO<sub>2</sub>    ≈ 74 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen der dt. Industrie (PtL)  
                         ≈ 21 Mt/a Holz (1,9-faches des dt. Waldrestholzes<sup>1</sup>) (PBtL)  
                         ≈ 11,76 Mio.ha Maisstroh (62,7 % der dt. Anbaufläche)



+

- 65 Mt/a H<sub>2</sub>O    ≈ 40 % der Trinkwasserentnahme aus dem Bodensee  
                         ≈ 1 % der verbrauchten Wassermenge



- 30 GW Anschlussleistung an Stromnetz (PtL)  
                         ≈ 16 % der heutigen installierten Leistung oder
- 70 GW offshore Windpark (47% Volllastanteil)  
                         ≈ Hälfte der Fläche Schleswig-Holsteins oder



- 300 GW PV (10% Volllastanteil)  
                         ≈ die Fläche des Saarlandes

=

➔ Erzeugung von 5,4 Mt/a H<sub>2</sub>



➔ **10,7 Mt/a ≈ Kerosinbedarf Deutschlands in 2014**



<sup>1</sup> K. Bunzel et al., IZR 5/6 2011, Seiten 297-308



## Gedankenexperiment:

**Von 2020 an jährlicher Zubau einer Kapazität von 1 % (107 kt) des deutschen Kerosinbedarfs aus nachhaltiger Produktion**



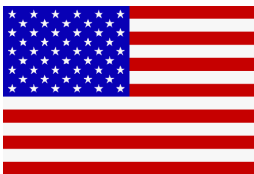


107 kt/a	BtL	PBtL	PtL
Strom (TWh)	- 0,45	1,59	2,59
Elektrolyse	-	200 MW	315 MW
CO <sub>2</sub> (kt)	-	-	331
Biomasse (kt)	803	212,9	-

Vergleichsgröße
Abgeregelt EEG-Strom: 4,0
Zubau Wind (2015): 74.6 MW <sub>eff</sub>
< 1 % der Industrieabgase in DE
Holzpelletverbrauch DE: 2.000 kt/a

Mio.€ (2015)	BtL	PBtL	PtL
Anlagen-Invest.	1.384	1.001	906
Hauptkosten	636 (V)	300 (E)	498 (E)



# Internationaler Ansatz für einen jährlichen Zubau nachhaltig erzeugten Kerosins?

	Verbrauch 2012 <sup>[1]</sup> [Mio.t]		1 % erneuerbar ab 2020 [kt/a]
• Deutschland	7		70
• Europa	55		550
• USA	53		530
• China	15		15
• Welt:	205		2.050

<sup>[1]</sup> [www.indexmundi.com/energy](http://www.indexmundi.com/energy)

# Zusammenfassung

- CO<sub>2</sub>-Begrenzung bei wachsendem Flugverkehr verlangt synthetische Kraftstoffe oder radikalen Technologiewechsel
- PtL-Technologie ist luftfahrttauglich – aber derzeit nicht wirtschaftlich, Potenzial rein landwirtschaftlich basierter Kraftstoffe begrenzt
- Kostensenkungspotenziale für synthetische Flugtreibstoffe aus Ökostrom
  - Strompreis
  - Elektrolyseeffizienz und -kosten
  - Technologieverbesserung
- Ohne politische Anreize
  - Kein massiver Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung
  - Keine Technologieentwicklung für Elektrolyse, Fischer-Tropsch, etc.
  - Keine Investitionen in Produktion, Verarbeitung und Distribution
  - Keine Markteinführung synthetischer Flugtreibstoffe aus Ökostrom (Ölpreis?)
  - Keine signifikante Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Luftfahrt



**Parallelforum 4C  
Power-to-X**

## **Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Dr. Ralph-Uwe Dietrich  
Fachgebiet Alternative Brennstoffe  
Institut für Technische Thermodynamik

[ralph-uwe.dietrich@dlr.de](mailto:ralph-uwe.dietrich@dlr.de)  
Tel.: 0711 / 6862-8215